

Information du lecteur



La première partie du document ci-après correspond à la traduction française des écrits mentionnés dans l'onglet « Information », publiés dans *Science*, vol. 196, 1977, p. 1161-1166. Ces écrits, en anglais, constituent la deuxième partie du présent document.

(ci-contre, François Jacob)

Évolution et bricolage

François Jacob¹

Certains des livres du XVI^e siècle consacrés à la zoologie et à la botanique sont illustrés par de superbes dessins représentant les animaux qui habitent notre planète. Certains de ces livres contiennent des descriptions détaillées de ces créatures comme des chiens à tête de poisson, des hommes avec des pattes de poulet ou même des femmes sans tête. La notion de monstres qui mélangent les caractéristiques de plusieurs espèces entre elles n'est pas en soi surprenante. Tout le monde a déjà imaginé ou dessiné de tels hybrides. Ce qui est aujourd'hui déconcertant c'est que de telles créatures aient pu, au XVI^e siècle, être conçues comme appartenant au monde réel et pas à un monde purement imaginaire. Beaucoup de personnes ont affirmé les avoir vues et les ont décrites en détail. Les monstres à cette époque coexistaient avec les animaux familiers de la vie de tous les jours. Ils n'étaient que les limites du possible.

Lorsque l'on lit des livres récents de science-fiction, on est frappé par la même observation, les animaux affreux qui chassent le pauvre astronaute perdu sur une planète lointaine sont toujours les produits de recombinaisons entre divers organismes vivant sur terre. Les créatures provenant de l'espace pour explorer notre planète ressemblent généralement toujours à des hommes. Vous pouvez les voir émerger d'un objet volant non identifié (OVNI), il s'agit toujours de vertébrés, des mammifères sans le moindre doute possible, et des vertébrés qui marchent debout. Les seules variations ne concernent que la taille de l'individu et le nombre de ses yeux. Ces créatures ont en général un crâne plus gros que celui des humains, afin de suggérer qu'elles possèdent aussi de plus gros cerveaux avec parfois une ou deux antennes sur la tête pour évoquer l'existence d'organes sensoriels très sophistiqués. A nouveau, ce qui est surprenant ici, c'est ce qui est considéré comme possible. L'idée ancienne – plus de 100 ans après la mort de Darwin – c'est que si la vie est apparue ailleurs que sur Terre, elle n'a pu revêtir que la forme d'animaux vivant actuellement sur la terre et que, surtout, elle n'a pu évoluer que vers la forme humaine.

Ce qui est intéressant dans l'histoire de ces monstres c'est qu'elle montre bien comment notre culture a pu appréhender le possible et en marquer les limites. C'est une constante de l'esprit humain que de vouloir ordonner notre univers et il est juste de dire que toutes les cultures ont plus ou moins réussi à délivrer à ceux qui les pratiquent une vue cohérente et unifiée du monde et des forces qui le gouvernent. On peut ne pas être d'accord avec le type d'explication offerts par la magie ou les mythes, mais on ne peut leur dénier une certaine unité ou un certain degré de

1. [note de la revue] L'auteur est professeur de génétique cellulaire à l'Institut Pasteur, 28 rue du Docteur Roux, 75015, Paris France. Cet article est le texte d'une conférence faite à Berkeley, Université de Californie, en Mars 1977.

cohérence. En fait, ces modes explicatifs sont souvent trop cohérents et trop unifiés du fait de leurs prétentions à tout expliquer à partir d'un argument unique. Actuellement, malgré leurs différences, qu'ils soient mythiques, magiques ou scientifiques, tous les systèmes explicatifs opèrent à partir d'un même principe. Dans le discours du physicien Jean Perrin, le cœur du problème est toujours « d'expliquer un visible compliqué à partir d'un invisible simple » (1). Une tempête peut ainsi être considérée soit comme étant le fruit de la colère de Zeus, soit, tout au contraire, comme résultant d'une différence de potentiel entre la Terre et les nuages. Une maladie peut être vue soit comme un coup du sort, soit, tout au contraire, comme la conséquence d'une infection virale. Cependant, dans tous les cas il faut toujours regarder l'effet visible de quelque cause cachée en relation avec l'ensemble des forces invisibles supposées conduire le monde.

UNE VISION SCIENTIFIQUE DU MONDE

Mythique ou scientifique, la vision du monde que l'homme se construit est largement un produit de son imagination. Pour le scientifique le processus ne consiste pas seulement à observer, à collecter des données et à en déduire une théorie. On peut regarder un objet pendant des années et ne jamais fournir une observation d'un quelconque intérêt scientifique. Pour produire une observation valable, il faut d'abord avoir une idée de ce qu'il faut réellement observer, une idée préconçue de ce qui est possible. Les avancées scientifiques sont le plus souvent le résultat d'un regard nouveau sur des choses jusqu'ici cachées et ce, plus parce qu'on les regarde sous un angle différent que par l'utilisation de nouveaux instruments. Ce regard est nécessairement guidé par une certaine idée de ce que l'on appelle réalité pourrait être. Il inclut toujours une certaine conception de ce qu'est l'inconnu, c'est-à-dire de ce qui reste derrière ce qu'on a des raisons logiques ou expérimentales de croire. Pour Peter Medawar, les investigations scientifiques débutent par « l'invention d'un monde possible ou d'une petite fraction de ce monde » (2). C'est aussi de cette manière que débute la pensée mythique, mais la comparaison s'arrête là et, après avoir construit ce qu'elle considère comme seul monde possible, elle fait facilement rentrer la réalité dans son schéma. Au lieu de cela, pour la pensée scientifique l'imagination n'est qu'une partie du jeu et, à chaque étape, elle doit se confronter à l'expérimentation et à la critique. Le meilleur monde est celui qui existe et qui a déjà démontré pouvoir fonctionner pendant une très longue période. La science doit toujours confronter le possible avec le présent.

Le prix à payer pour ce type de vision est néanmoins très élevé. Il faut en effet, peut-être plus que jamais, renoncer à un monde unifié. Ceci est le résultat de la façon dont fonctionne la science elle-même. En effet, généralement, la plupart des autres systèmes explicatifs mythiques, magiques ou religieux, se veulent tout recouvrir et répondre à toutes les questions possibles. Ils se veulent être applicables à tous les domaines et rendre compte des origines, du présent et du futur de l'univers. La science procède tout différemment. Elle opère au moyen d'expériences détaillées sur

la nature et apparaît ainsi moins ambitieuse, tout au moins dans une première approche. Elle ne cherche pas à obtenir en une seule fois une explication complète et définitive de tout l'univers, de son origine et de son état actuel. Au lieu de cela, elle cherche à obtenir des réponses partielles et provisoires à des phénomènes bien définis que l'on peut isoler. On peut dater les débuts de la science moderne de l'époque où des questions d'ordre très général comme « Comment s'est créé l'univers ? Quelle est la matière avec laquelle est constituée la vie ? Quelle est l'essence de la vie ? » ont été remplacées par des questionnements plus limités comme « Comment tombe un caillou ? Comment se fait-il que de l'eau puisse couler dans un tube ? Comment le sang peut-il circuler dans les vaisseaux ? ». De telles substitutions aboutissent à un résultat plutôt amusant et paradoxal puisque poser des questions très générales aboutit à des réponses limitées, alors que l'on obtient des réponses de plus en plus générales à des questions limitées.

Néanmoins, au même moment, la méthode scientifique peut difficilement éviter un morcellement des vues que l'on peut avoir sur le monde. Chaque branche de la science explore un domaine particulier qui n'est pas nécessairement connecté aux domaines voisins. La connaissance scientifique apparaît ainsi faite d'îlots isolés les uns des autres. Dans l'histoire des sciences, des avancées importantes proviennent souvent de l'établissement de ponts entre ces différents îlots de connaissance. Ces ponts proviennent de la découverte que deux observations jusqu'ici séparées pouvaient être regardées sous un angle nouveau et considérées comme n'étant en fait que les nouvelles facettes d'un même phénomène. Il en est ainsi pour les mécanismes terrestres ou célestes qui sont devenus une même science de par les lois de Newton. La thermodynamique et la mécanique ont été unifiées grâce aux lois de la mécanique statistique, tout comme l'ont été l'optique et le thermomagnétisme grâce à la théorie de Maxwell sur le champ magnétique ou la chimie et la physique des atomes grâce à la mécanique quantique. Dans le même ordre d'idées, plusieurs combinaisons utilisant les mêmes atomes peuvent entrer, à la fois, dans la composition de choses inanimées et dans celle d'êtres vivants.

LA HIÉRARCHIE DES OBJETS

Malgré de telles généralisations, de nombreux vides persistent dans nos connaissances et certains le resteront probablement encore pour pas mal de temps. Il existe aujourd'hui toute une série de sciences qui diffèrent non seulement par la nature des objets sur lesquelles elles portent, mais aussi par les concepts et le langage qu'elles utilisent. On peut arranger ces sciences selon un certain ordre – physique, chimie, biologie, psychosociologie – un ordre qui correspond à une hiérarchie dans la complexité trouvée dans les objets de ces sciences. Si l'on suit la ligne qui va de la physique à la sociologie, on va d'objets les plus simples au plus complexes mais aussi, pour des raisons évidentes, des sciences les plus anciennes aux sciences les plus récentes, du contenu le plus pauvre au contenu le plus riche, du système d'hypothèses et d'expérimentations le plus rigoureux au système le plus laxiste. Afin

d'avoir une vue unifiée du monde grâce à la science, la question s'est posée de façon répétée d'établir des ponts entre les disciplines proches. A cause de la hiérarchie des objectifs, le problème est toujours d'expliquer le plus complexe dans des termes et avec des concepts qui puissent s'appliquer au plus simple. C'est le vieux débat de la réduction, de l'émergence, de l'ensemble et des parties et ainsi de suite. Est-il possible de réduire la chimie en physique, la biologie en physique plus chimie etc...? Il est clair qu'il est nécessaire de d'abord comprendre ce qui est simple avant de comprendre le plus complexe, mais est-ce suffisant ? Cela reste discutable.

Ce genre de questions a abouti à une argumentation sans fin. À l'évidence les deux événements critiques de l'évolution, c'est-à-dire d'abord l'apparition de la vie, puis celle de la pensée et du langage, ont généré des phénomènes jusque là inexistants sur terre. Pour décrire et interpréter ces phénomènes, il faut maintenant de nouveaux concepts, sans valeur au niveau précédent. Que peuvent bien vouloir signifier en physique ou en chimie des notions comme la sexualité, la prédation ou la douleur ? Que peuvent bien vouloir dire en biologie des idées comme l'idée de justice, celle d'une plus-value ou encore celle de pouvoir démocratique ? À la limite, un réductionnisme total aboutirait à une absurdité. Au prétexte que chaque niveau puisse être complètement réduit en un niveau plus simple, ceci aboutirait, par exemple, à expliquer la démocratie en termes de structure et de propriétés des particules élémentaires, ce qui est clairement un non-sens.

On peut considérer le problème d'une autre manière. On peut regarder les séries d'objet en allant du plus simple au plus complexe. Les molécules sont faites d'atomes. Elles obéissent donc aux lois qui régissent le comportement des atomes, mais il faut, en plus, rappeler deux caractéristiques concernant ces molécules. La première c'est qu'elles peuvent présenter de nouvelles propriétés comme l'isomérisation, la racémisation et bien d'autres. La seconde, qui est centrale en chimie, c'est que les molécules trouvées dans la nature ou fabriquées en laboratoire ne représentent qu'une des interactions possibles entre des atomes. La chimie n'est donc qu'une des formes de la physique. C'est encore plus évident pour la biologie qui a trait à toute une hiérarchie complexe d'objets depuis les cellules jusqu'aux populations et aux écosystèmes. Les objets qui existent à chacun de ces niveaux forment en eux-mêmes la limite des possibilités totales offertes par le niveau le plus simple. Par exemple, le groupe de molécules trouvé dans des organismes vivants représente un éventail très restreint d'objets chimiques. Au niveau suivant, le nombre d'espèces animales peut atteindre plusieurs millions ; c'est, cependant, un nombre relativement faible par rapport à celui qui doit exister. Tous les vertébrés sont composés d'un nombre très limité de types cellulaires, au maximum 200, comme les cellules musculaires, les cellules de la peau et les cellules nerveuses. La grande diversité des vertébrés résulte de différences dans l'arrangement, le nombre et les proportions des 200 types cellulaires qui les composent. De la même façon, les sociétés humaines qui sont le sujet de l'ethnologie et de la sociologie ne représentent qu'un groupe restreint des interactions possibles entre tous les êtres humains.

CONTRAINTES ET HISTOIRE

La nature fonctionne par intégration. Quel que soit le niveau, les objets analysés par les sciences naturelles sont toujours des modes d'organisation ou des systèmes. Chaque système à un niveau donné utilise, comme éléments constitutifs, d'autres systèmes provenant d'un niveau plus simple, mais seulement quelques-uns. La hiérarchie dans la complexité des objets est ainsi accompagnée par une série de restrictions et de limitations. À chaque niveau, de nouvelles propriétés peuvent ainsi apparaître qui imposent de nouvelles contraintes au système, mais il s'agit de contraintes qui sont surtout des contraintes supplémentaires. Celles qui continuent à opérer à n'importe quel niveau sont encore valides à un niveau plus élevé de complexité. Chaque proposition qui est vraie en physique l'est aussi en chimie, en biologie ou en sociologie. De la même manière chaque proposition qui est valide en biologie le reste en sociologie, mais en règle générale les formulations qui sont très importantes à un niveau donné sont de peu d'intérêt à un niveau plus complexe. La loi des gaz parfaits n'est pas plus vraie quand il s'agit de biologie ou de sociologie que lorsqu'il s'agit de physique. Elle est simplement sans objet dans le contexte des problèmes qui sont ceux des biologistes et encore plus des sociologistes.

Cette hiérarchie d'intégrations successives, caractérisée par des restrictions et par l'apparition de nouvelles propriétés à chaque niveau a plusieurs conséquences. La première c'est la nécessité d'analyser les objets complexes à tous les niveaux. Si la biologie moléculaire, qui est d'abord réductionniste, a abouti au succès que l'on sait pour comprendre l'hérédité, c'est surtout parce que, à chaque niveau, l'analyse a été conduite en même temps au niveau moléculaire et à celui de la boîte noire, la cellule bactérienne. Ceci s'applique aussi aux développements récents en matière d'immunologie et il semble bien qu'une telle convergence dans l'analyse jouera dans l'avenir un rôle important dans l'étude des êtres humains et de leurs sociétés.

Le second point concerne la prédictibilité. Il est possible d'effectuer des prédictions à un niveau donné sur les bases de ce qui est connu à un niveau plus simple, mais seulement jusqu'à un certain niveau. Les propriétés d'un système peuvent être expliquées par les propriétés de leurs composés, mais elles ne peuvent en être déduites. En partant des lois fondamentales de la physique il n'y a aucun moyen de reconstruire l'univers. Ceci veut dire qu'un système particulier, disons une cellule, n'a qu'une certaine probabilité d'apparaître. Toutes les prédictions sur son existence ne peuvent être que statistiques. La biologie moléculaire a démontré que, finalement, les caractéristiques d'une cellule se trouvent dans la structure de leurs composés moléculaires, mais l'apparition de la vie sur terre n'est pas nécessairement la conséquence la présence de certaines structures moléculaires au cours de l'ère prébiotique. En fait, il n'y a absolument aucun moyen d'estimer la probabilité qu'a eu la vie d'apparaître sur la terre et il est tout à fait possible que la vie ne soit apparue qu'une seule fois.

Le troisième point concerne la nature des restrictions et des limitations trouvées à chacune des étapes d'une complexité croissante. Peut-on expliquer

pourquoi, parmi les nombreuses possibilités d'interactions à un seul niveau, seulement certaines ne sont observées qu'à un niveau plus complexe ? Comment se fait-il, par exemple, que ce soit seulement ce type de structure moléculaire qui soit présent dans un organisme vivant et pas un autre ? Ou ce mode d'interaction dans une société ? Il n'y a généralement pas de réponse à ce genre de questions et il est douteux qu'il y ait jamais de réponse spécifique pour chacun des niveaux de complexité. Les objets complexes sont produits par le processus évolutionniste qui est dominé par deux facteurs : les contraintes qui, à chaque niveau, contrôlent les systèmes considérés et les circonstances historiques qui contrôlent les interactions présentes entre les systèmes. La combinaison des contraintes et de l'histoire existe à tous les niveaux, bien que dans des proportions différentes. Les objets plus simples dépendent plus des contraintes que de l'histoire. Au fur et à mesure où croît la complexité, l'histoire joue un rôle plus important. Mais l'histoire doit toujours être prise en considération, même en physique. D'après les théories actuelles les noyaux les plus lourds sont composés de noyaux plus légers et pour finir de noyaux d'hydrogène et de neutrons. La transformation de l'hydrogène lourd en hélium survient durant la fusion qui est la source principale d'énergie dans le soleil aussi bien que dans les bombes à hydrogène. L'hélium, et tous les éléments plus lourds, sont ainsi le résultat de l'évolution du cosmos. Selon les théories actuelles les éléments plus lourds sont considérés comme étant le produit de l'explosion de supernova. Ils semblent être très rares et ne peuvent excéder 1 à 2 pour cent en masse de toute matière, alors que l'hélium représente un cinquième et l'hydrogène les quatre cinquièmes de toute matière. La Terre et les autres planètes du système solaire ont ainsi été faites de matériaux très rares dans des conditions qui semblent être rarement rencontrées dans le cosmos. La source de l'hydrogène elle-même est laissée aux théories et aux spéculations concernant les origines de l'univers.

SÉLECTION NATURELLE

Les contraintes auxquelles les systèmes sont soumis varient avec le niveau de complexité. Il existe toujours un certain nombre de contraintes imposées par la stabilité et la thermodynamique, mais quand la complexité augmente, des contraintes nouvelles apparaissent, comme la reproduction pour les systèmes vivants ou les exigences économiques pour les systèmes sociaux. En conséquence il ne peut y avoir de lois générales de l'évolution et aucune recette ne peut rendre compte de la complexité croissante à tous les niveaux. Depuis Darwin les biologistes ont progressivement élaboré une image raisonnable, bien qu'encore incomplète, du mécanisme qui opère dans l'évolution du monde vivant, à savoir la sélection naturelle. Pour certains la tentation a été grande d'invoquer le même mécanisme de sélection pour décrire tous les types possibles d'évolution qu'ils soient cosmologiques, chimiques, culturels, idéologiques ou sociaux. Cette tentative semble néanmoins vouée à l'échec dès le départ. Les règles du jeu diffèrent à chaque niveau. De nouveaux principes doivent donc être définis pour chacun des niveaux.

La sélection naturelle est le résultat de deux contraintes imposées à tout organisme vivant : (i) la nécessité de la reproduction qui est satisfaite grâce à des mécanismes génétiques soigneusement ajustés par des outils très particuliers comme les mutations, les recombinaisons et par le sexe qui permet de reproduire des organismes semblables mais non identiques ; (ii) la nécessité d'une interaction permanente avec l'environnement parce que les êtres vivants sont ce que les thermodynamiciens appellent des systèmes ouverts qui ne survivent que grâce à un flux constant de matière, d'énergie et d'informations. Le premier de ces facteurs génère des variations au hasard et produit des populations composées d'individus différents. Les interactions de ces deux facteurs ont pour résultat une reproduction différentielle et, en conséquence, des populations qui évoluent progressivement en fonction des circonstances environnementales, des comportements et des nouvelles niches écologiques. Mais la sélection naturelle n'agit pas principalement comme un tamis qui élimine les mutations délétères et favorise la reproduction des mutations bénéfiques comme cela a été souvent suggéré. Au long court, elle intègre des mutations et les organise en réseaux cohérents sur le plan de l'adaptation et ajusté pendant des millions d'années et sur des millions de générations en réponse aux défis environnementaux. C'est la sélection naturelle qui donne un sens aux changements, oriente la chance et produit lentement et progressivement des structures plus complexes, de nouveaux organes et de nouvelles espèces. Des nouveautés proviennent d'associations avec du matériel ancien et non observées préalablement. Créer, c'est finalement recombinaison.

INGÉNIEUR ET BRICOLEUR

Les effets de la sélection naturelle ont souvent été comparés à ceux d'un ingénieur, ce n'est pas une comparaison valable pour plusieurs raisons. D'abord parce que, à la différence de ce qui se passe dans l'évolution, l'ingénieur travaille par rapport à un plan préconçu d'après lequel il peut prévoir le fruit de son travail. Ensuite, à cause de la manière dont travaille un ingénieur : pour fabriquer un produit nouveau, il a à sa disposition à la fois un matériel spécialement conçu à cet effet et des machines destinées à cette tâche spécifique. Finalement, les objets qui sont fabriqués par un ingénieur, tout au moins par un bon ingénieur, sont proches de la perfection, tout au moins du niveau de perfection que l'on peut attendre de la technologie du moment. Tout au contraire, l'évolution est toujours loin de la perfection. C'est un point qui a été souligné de façon répétée par Darwin qui, toute sa vie, a combattu l'idée selon laquelle la création était toujours parfaite. Dans *L'Origine des Espèces* Darwin souligne, encore et encore, les imperfections fonctionnelles ou structurelles du monde vivant. Par exemple, quand il discute la sélection naturelle (3, page 472)² :

2. [NdT] La traduction de référence du livre de Darwin est celle établie par Daniel Becquemont à partir de la traduction de l'anglais d'Edmond Barbier. Darwin. Nous nous en sommes, bien entendu, inspiré. *L'origine des espèces*. GF Flammarion, Paris 1992.

Nous ne devons pas nous étonner de ce que toutes les combinaisons de la nature ne soient pas, de notre point de vue, absolument parfaites. Nous ne devons pas nous étonner de ce que l'aiguillon de l'abeille cause très souvent la mort de l'individu qui l'utilise ; de ce que les mâles, chez cet insecte, soient produits en aussi grand nombre pour ne finalement accomplir qu'un seul acte et soient ensuite massacrés par leurs sœurs stériles ; du phénoménal gaspillage du pollen par nos pins ; de la haine instinctive qu'éprouve la reine abeille pour ses filles fécondes ; de ce que les Ichneumonidae³ s'établissent dans le corps vivant d'une chenille et s'en nourrissent, et de tant d'autres cas analogues. Ce qu'il y a réellement de plus étonnant dans la théorie de la sélection naturelle, c'est que l'on ait finalement observé que si peu d'exemples de perfection absolue.

Il y a d'innombrables citations analogues dans *L'Origine des Espèces*. En fait, l'un des meilleurs arguments contre la perfection provient de l'histoire des extinctions des espèces. Alors que l'on peut estimer le nombre d'espèces vivantes dans le règne animal autour d'environ quelques millions, le nombre exact des espèces éteintes depuis que la vie existe serait, pour Simpson (4), plutôt autour de cinq cent millions.

La sélection naturelle n'a d'analogie avec aucun des aspects du comportement humain. Cependant si l'on veut tenter une comparaison, il faudrait dire que la sélection naturelle n'a rien à voir avec le travail d'un ingénieur. Elle fonctionne comme le ferait un bricoleur – un bricoleur qui ne sait pas exactement ce qu'il est en train de fabriquer, mais qui utilise tout ce qui lui tombe sous la main, des bouts de ficelle, des fragments de bois ou de vieille cartes postales ; en bref elle travaille comme un bricoleur qui utilise tout ce qui est à sa disposition pour fabriquer et produire une sorte d'objet qui puisse fonctionner. Pour l'ingénieur, la réalisation de son travail dépend à la fois des matières premières et des outils adaptés qui sont à sa disposition. À l'inverse le bricoleur se débrouille toujours avec des objets qui ne sont en général qu'un véritable bric-à-brac. Le produit final n'est généralement pas lié directement à un projet spécifique et résulte de toute une série d'événements contingents, de toutes les opportunités qu'il a eu d'enrichir son stock de pièces anciennes. Comme l'a souligné Claude Lévi-Strauss (5), aucun des matériaux à la disposition du bricoleur n'a de fonction précise et définie. Chacun peut être utilisé de plusieurs manières. À la différence des outils de l'ingénieur, ceux du bricoleur ne peuvent pas être définis par un projet. Ce que ces objets ont en commun c'est que « cela pourrait bien servir à quelque chose ». À quoi ? Cela dépend des opportunités.

L'ÉVOLUTION COMME UN BRICOLAGE

Le mode opératoire du bricolage a plusieurs points communs avec le processus de l'évolution. Assez souvent, sans projet à long terme bien défini, le bricoleur donne à son matériel des fonctions inattendues afin de fabriquer un nouvel objet. Il fera une

3. [NdT] Insectes de la famille des hyménoptères à nervure alaire utilisés depuis longtemps pour lutter contre les chenilles qui dévastent certaines forêts.

roulette de casino à partir d'une vieille roue de bicyclette ou un coffre de radio à partir d'une chaise cassée. De même l'évolution fabrique une aile à partir d'une patte ou une oreille à partir d'un morceau de mâchoire. Ceci a naturellement pris du temps. L'évolution se comporte comme un bricoleur qui, d'éon en éon⁴, modifierait lentement son travail, le retouchant de façon incessante, coupant ici, allongeant là, saisissant chaque opportunité de s'adapter progressivement à son nouvel usage. Le poumon des vertébrés terrestres, par exemple, s'est, selon Mayr (6), formé de la manière suivante. Son développement a commencé chez certains poissons d'eau douce vivant dans des mares d'eau stagnante pauvres en oxygène. Ces poissons ont pris l'habitude d'avaler l'air et d'absorber l'oxygène à travers la paroi de leur œsophage. Dans ces conditions, un élargissement de la surface de l'œsophage représentait un avantage sélectif. Des diverticules de l'œsophage sont apparus et, sous la pression continue de la sélection naturelle, se sont élargis pour former les poumons. L'évolution ultérieure du poumon s'est poursuivie essentiellement sur ce thème : élargir la surface pour capter l'oxygène et vascularisation. De ce fait, la fabrication d'un poumon à partir d'un morceau d'œsophage ressemble bien à un bricolage.

À la différence des ingénieurs, les bricoleurs qui s'attaquent à un problème ont généralement plusieurs solutions à leur problème. Ceci s'applique également à l'évolution comme c'est le cas, par exemple, pour l'extrême diversité des yeux observée dans le monde du vivant [voir (7)]. C'est, à l'évidence, un grand avantage de posséder, dans plusieurs conditions, des photorécepteurs et l'extrême variété des photorécepteurs dans le monde vivant est très intéressante. Les plus sophistiqués sont les yeux formant des images qui fournissent des informations non seulement sur l'intensité de la lumière qui y pénètre, mais aussi sur les objets d'où provient la lumière, sur leur forme, leur couleur, leur position, leur mouvement, leur vitesse, la distance où ils se trouvent. De telles structures sophistiquées sont forcément très complexes et ne peuvent se développer que dans des organismes déjà très complexes eux-mêmes. On pourrait supposer qu'il n'y a qu'un seul moyen de fabriquer de telles structures, ce qui n'est pas le cas. Des yeux sont apparus plusieurs fois au cours de l'évolution et sont caractérisés par au moins trois éléments principaux : un petit trou, des lentilles et de nombreux tubes. Les lentilles des yeux, comme les nôtres, apparaissent chez les mollusques et chez les vertébrés. Rien ne ressemble plus à nos yeux que les yeux de pieuvre, ils fonctionnent de la même manière. Alors que, chez les vertébrés, les cellules photoréceptrices de la rétine ne pointent pas vers la lumière, chez les mollusques elles sont orientées vers la lumière. Parmi toutes les solutions trouvées au problème, celles-ci sont similaires mais non identiques. Dans chaque cas la sélection naturelle a fait ce qu'elle pouvait avec le matériel qui était à sa disposition.

L'évolution ne produit pas de nouveautés sur un simple coup d'ongle. Elle fonctionne à partir de ce qui existe déjà, soit en transformant un système pour lui

4. [NdT] Un éon est une période de temps de durée arbitraire. L'histoire de la Terre comprend quatre éons.

donner une nouvelle fonction soit en combinant plusieurs pour produire une fonction plus élaborée. Ceci arrive, par exemple, durant l'un des événements les plus importants de l'évolution cellulaire à savoir le passage des espèces unicellulaires aux espèces multicellulaires. Il s'agit là d'une transition particulièrement importante parce qu'elle a un énorme potentiel pour la spécialisation des cellules. Une telle transition, qui est probablement survenue plusieurs fois, ne nécessite pas la création de nouveaux composés chimiques car il n'y a aucune différence majeure dans la composition moléculaire des organismes uni et multicellulaires. C'est principalement une réorganisation de ce qui existait déjà.

LE BRICOLAGE MOLÉCULAIRE

C'est au niveau moléculaire que le bricolage est probablement le plus apparent. Ce qui caractérise le monde vivant c'est aussi bien sa diversité que son unité sous-jacente. Le monde vivant comprend à la fois les bactéries et les requins, les virus et les éléphants, des organismes vivant à -20°C dans les espaces polaires et d'autres à $+70^{\circ}\text{C}$ lors d'étés très chauds. Tous ces objets ont cependant une remarquable unité dans leur structure chimique comme dans leurs fonctions. Des polymères similaires, les acides nucléiques ou les protéines sont toujours composés des mêmes éléments de base, les quatre bases et les vingt acides aminés jouent un rôle semblable. Le code génétique est le même et la machinerie de la traduction est presque toujours la même. Les mêmes coenzymes régissent des réactions comparables. Plusieurs étapes métaboliques restent essentiellement les mêmes de la bactérie à l'homme. A l'évidence, pour qu'émerge la vie, un certain nombre de nouveaux types moléculaires doivent d'abord être formés. Toutes ces molécules qui vont constituer les organismes vivants doivent apparaître durant l'évolution chimique qui se poursuit durant la période prébiotique et au tout début de l'évolution, mais une fois que la vie est apparue sous la forme d'un organisme primitif, capable de se reproduire lui-même, l'évolution doit ensuite procéder rapidement grâce à des modifications de composants qui existaient déjà. De nouvelles fonctions se développent lorsque de nouvelles protéines apparaissent, mais il s'agit surtout là de variations sur un thème ancien. Une séquence d'un millier de nucléotides code une protéine de taille moyenne, mais la probabilité qu'une protéine fonctionnelle apparaisse de novo par association au hasard d'acides aminés est pratiquement zéro. Dans des organismes aussi complexes et aussi intégrés que ceux qui étaient déjà vivants il y a très longtemps, la création de séquences de nucléotides entièrement nouvelles pourrait ne pas être de grande importance dans la production de nouvelles informations.

L'apparition de nouvelles structures moléculaires durant tout le cours de l'évolution doit donc être basée sur des altérations de structures pré-existantes. La preuve en est que l'on trouve des grands fragments d'information homologues sous forme d'ADN non seulement dans le même organisme mais aussi chez différents organismes, et même chez des organismes phylogénétiquement très distants. De la

même manière, au fur et à mesure que l'on connaît mieux la composition en acides aminés des protéines, il apparaît que beaucoup de protéines possédant des fonctions semblables dans différents organismes ont souvent des séquences en acides aminés semblables, mais qu'il existe aussi des protéines possédant des fonctions très différentes qui ont en commun de larges séquences. L'hypothèse la plus couramment acceptée pour expliquer ces similitudes a été proposée par Horowitz (8), par Ingram (9) et par Ohno (10). Un segment d'ADN, correspondant à un ou plusieurs gènes, est supposé s'être dupliqué par un mécanisme génétique. Quand un gène existe sous forme de plus d'une copie dans une cellule ou un gamète, il est libéré des contraintes imposées sur sa fonction par la sélection naturelle. Des mutations peuvent alors s'accumuler plus ou moins librement et le résultat final en est l'apparition de nouvelles protéines pouvant posséder éventuellement de nouvelles fonctions. Puisque la sélection naturelle exerce une pression continue sur les organismes, une altération dans une protéine peut être améliorée plus tard par l'apparition d'autres changements. Cela peut aussi conduire à une modification dans les interactions avec d'autres protéines et, éventuellement, à favoriser les modifications de ces protéines. Une large fraction du génome des organismes complexes pourrait actuellement dériver d'un petit nombre de gènes ancestraux.

Les changements biochimiques ne semblent donc pas être la principale force qui soit à l'origine de la diversification des organismes vivants. La partie véritablement créatrice de la biochimie a du survenir plus tôt. Il faut en effet, pour que l'unité biochimique des êtres vivants ait vraiment un sens, que les plus importants des types moléculaires rencontrés dans le vivant existent déjà dans des organismes très primitifs comme les bactéries, ceux qui figurent dans les principales voies métaboliques responsables de la production de l'énergie et de sa dégradation ou ceux qui sont responsables de la synthèse des principales structures cellulaires. Une fois cette étape passée, l'évolution biochimique continue au fur et à mesure qu'apparaissent des organismes plus complexes, mais ce ne sont pas les nouveautés biochimiques qui sont responsables de la diversification des organismes. Il est très vraisemblable que le processus de diversification fonctionne d'une autre manière. C'est la pression sélective qui résulte soit des changements de comportement, soit des modifications des niches écologiques qui conduit les ajustements biochimiques et change les types moléculaires. Ce qui distingue un papillon d'un lion, un lièvre d'une mouche ou un ver de terre d'un requin est beaucoup plus qu'une simple différence dans la composition chimique et porte sur l'organisation et la distribution de ses constituants. Les quelques grandes étapes de l'évolution demandent l'acquisition de nouvelles informations, mais la spécialisation et la diversification apparaissent grâce à une utilisation différente des mêmes informations structurales. La composition chimique d'espèces voisines, comme les vertébrés, est la même. Ce qui fait qu'un vertébré diffère d'un autre, c'est plus une modification dans la date de l'expression et dans les quantités relatives des produits des gènes que de petites différences observées dans la structure de ces produits. C'est un problème de régulation plutôt qu'un problème de structure [voir (11)].

Après la fertilisation de l'œuf, le développement embryonnaire survient selon une séquence fixe et un calendrier extrêmement précis qui figurent dans un programme génétique présent dans les chromosomes. Ce programme détermine quand et où vont apparaître les nouvelles lignées de cellules différenciées, quand et où les différentes protéines seront fabriquées et dans quelle quantité. La qualité et la quantité des différentes protéines varient en fonction du temps et de l'espace durant le développement. Ainsi chez l'adulte, les différents types de cellules et de tissus contiennent différents répertoires de types moléculaires en accord avec leurs nouvelles fonctions. Le programme génétique est exécuté grâce à un réseau complexe de circuits de régulation qui déclenchent ou interrompent les différentes voies biochimiques. On connaît peu de choses actuellement sur les circuits de régulation qui opèrent dans le développement des organismes complexes, mais on sait que chez des organismes comme les mammifères, les premières étapes du développement embryonnaire sont remarquablement similaires, et que les divergences n'apparaissent que progressivement au cours du développement. Ces divergences concernent beaucoup moins les structures actuelles des types cellulaires ou moléculaires que leurs nombres ou leurs positions. Il est vraisemblable que la divergence et la spécialisation des mammifères, par exemple, soit le fruit de mutations altérant les circuits de régulation plutôt que les structures biochimiques. De petites modifications dans la distribution spatio-temporelle des mêmes structures suffisent pour modifier de façon importante la forme, le fonctionnement et le comportement du produit final, c'est-à-dire l'animal à l'état adulte. Il s'agit toujours d'une manière d'utiliser le même élément, de l'ajuster, de l'altérer çà et là ou d'en organiser des combinaisons variées qui produiront de nouveaux objets de complexité croissante. Il s'agit toujours d'un authentique bricolage.

CONSÉQUENCES DE CE BRICOLAGE

Des témoins de ce bricolage se retrouvent à chacun des niveaux du monde du vivant. On les trouve, bien évidemment, chez les êtres humains comme le montrent plusieurs exemples. Chez l'homme, comme chez bien des mammifères, il existe des systèmes complexes responsables de la coagulation, des réactions inflammatoires contre des corps étrangers et des défenses immunitaires médiées par ce que l'on appelle le système du complément. Ces trois processus ont été analysés indépendamment et en détail ces dernières années. Chacune d'entre eux est d'une complexité inattendue. Chacun comprend dix protéines dont aucune n'a initialement d'activité enzymatique. La conversion de la première protéine en une forme catalytiquement active déclenche une cascade de réactions. La première protéine clive la seconde en un point spécifique, le produit de cette réaction clive à son tour la troisième protéine et ainsi de suite. Dans cette série de réactions les protéines individuelles sont ainsi découpées par séquences et les fragments qui sont ainsi libérés servent d'activateurs ou d'inhibiteurs pour d'autres réactions de la chaîne. Plus tard, ces trois chaînes de réaction ne sont pas totalement indépendantes. Un

produit du clivage dans une chaîne peut soudainement devenir un élément actif dans une autre chaîne ou même jouer un rôle dans une réaction complètement différente. Ces produits peuvent servir de signaux pour connecter des systèmes sans relations chimiques les uns avec les autres, mais physiologiquement dépendants. Tout se passe comme si une molécule protéique formée ici était utilisée ici ou là comme une source de peptides plus petits, mais actifs, au fur et à mesure que de nouvelles fonctions s'établissent. Récemment, on a pu découvrir un certain nombre de peptides de tailles différentes qui participaient à différents processus physiologiques. Certains d'entre eux, comme les peptides hormonaux ou des peptides cérébraux, sont connus comme n'étant pas transformés chimiquement au cours de la réaction qu'ils inhibent ou activent. Ils apparaissent juste comme se liant à certaines protéines afin de favoriser une transition allostérique, agissant ainsi comme un simple signal chimique. Pour le biologiste, il est simplement impossible de prédire, ou même de deviner avec succès, quoi que ce soit concernant la nature de telles molécules et leurs relations structurelles avec d'autres constituants. Tout ce qu'il peut faire c'est les détecter, les purifier et les analyser. Plus tard, lorsque les structures de ces protéines deviendront mieux connues, il y aura peut-être une chance que l'on puisse ainsi définir les interrelations fonctionnelles et évolutionnistes existant entre de telles molécules.

Un autre exemple de ce bricolage peut se trouver aux tout premiers stades du développement embryonnaire chez l'homme. Le développement embryonnaire est un processus terriblement compliqué sur lequel on connaît actuellement bien peu de choses. Des études faites il y a 10 ou 20 ans ont mis en évidence un phénomène très surprenant. On estime en effet que, dans les populations humaines, environ 50 pour cent des conceptions aboutissent à un avortement [voir (12)]. Une grande partie de ces avortements survient durant les trois premières semaines de la grossesse et passent généralement inaperçus. Ainsi, dans une grossesse sur deux, quelque chose ne fonctionne pas normalement dès le début. On a montré que plusieurs de ces avortements spontanés étaient dus à l'existence d'un nombre impair de chromosomes ; au lieu de posséder deux groupes de chromosomes, l'un provenant du père et l'autre de la mère, les embryons possèdent soit un chromosome supplémentaire, soit au contraire un chromosome en moins, soit encore trois groupes de chromosomes. Le résultat en est que certaines fonctions nécessaires au développement embryonnaire ne fonctionnent pas normalement. Le fœtus meurt et est expulsé. C'est ainsi que beaucoup de fœtus potentiellement malformés disparaissent ; pas tous, malheureusement, puisque certains arrivent à terme. Ceci met en évidence les imperfections d'un mécanisme qui est au cœur de tout système vivant et qui a été mis au point pendant des millions d'années.

Un troisième exemple de bricolage très intrigant est celui de l'association entre reproduction et plaisir. Le sexe est une des inventions les plus efficaces de l'évolution. Chez les organismes les plus primitifs qui se reproduisent de façon asexuée, par simple fission, le programme génétique est scrupuleusement recopié à chaque génération. À l'intérieur d'une même population il reste toujours le même,

exception faite de rares mutations. La division de l'organisme est un processus automatique qui résulte de la croissance. Lorsque quelque chose qui ressemble à la sexualité existe, comme chez les bactéries, il s'agit d'un véritable luxe. Dans de telles populations, l'adaptation inclut nécessairement la sélection de mutants rares sous l'influence de contraintes environnementales. Au contraire la reproduction sexuée, qui est très probablement apparue très tôt au cours de l'évolution, est une contrainte et oblige à un réassortiment des programmes génétiques dans les populations qui se reproduisent entre elles. Le résultat c'est que chaque programme génétique (c'est-à-dire en fait chaque individu) est différent l'un de l'autre. Ce réajustement permanent des éléments génétiques fournit d'énormes potentialités pour l'adaptation, mais une fois que la sexualité est devenue une condition nécessaire à la reproduction, elle demande des mécanismes spéciaux : l'un qui permette aux individus de sexe opposé de se reconnaître et de se rencontrer et le second de les conduire à s'accoupler. La première de ces conditions a été remplie par de nombreux systèmes spécifiques de signalisation, des systèmes visuels, auditifs, olfactifs d'une grande précision et d'une non moins grande efficacité. Le second est apparu au cours du développement de programmes comportementaux rigides et génétiquement déterminés. Par exemple, chez les oiseaux, au cours de saisons très précises, la simple vision d'un individu du sexe opposé initie tout une série de manifestations rituelles, de parades qui conduisent quasi-automatiquement à la copulation, à la nidation et à l'élevage de la descendance. Cependant le cours de l'évolution est caractérisé par une tendance à une plus grande flexibilité dans l'exécution du programme génétique et, au fur et à mesure que ce programme devient de plus en plus ouvert, les comportements deviennent de moins en moins déterminés par les gènes. Les réactions en réponse aux signaux sexuels deviennent de moins en moins automatiques. Afin de conduire les individus vers la reproduction, la sexualité doit être associée avec d'autres accessoires et parmi eux il y a le plaisir. Dans le dictionnaire d'Oxford, plaisir est défini comme étant «l'opposé de la douleur», ce qui est bien évident, mais aussi comme «un état de conscience lié à la satisfaction de ce qui est ressenti ou vu comme bon ou désirable». Il semble bien évident que le sentiment d'inconfort ou de plaisir existe depuis très longtemps chez les animaux complexes. Un animal a plus de chances d'avoir une descendance si un sentiment d'inconfort le dissuade de se mettre dans des situations difficiles. Il est clair que l'existence de centres nerveux, connectés avec le système sensoriel et capables de relier ce qui est ressenti comme plaisant ou déplaisant avec ce qui est présentement bon ou mauvais pour la survie, a une grande valeur sélective. On connaît bien maintenant de tels centres. Il y a environ vingt ans, des neurobiologistes ont détecté dans le cerveau, d'abord du rat et plus tard chez d'autres vertébrés, la présence de deux centres remarquables, l'un appelé centre de l'aversion, l'autre centre d'autostimulation. Lorsque l'on implante correctement des électrodes dans le cerveau et qu'on donne au rat les moyens d'activer à volonté ce dernier centre, l'animal se donne lui-même du plaisir jusqu'à en mourir d'épuisement. Les expériences réalisées au cours d'interventions chirurgicales et les descriptions des ressentis des patients laissent planer peu de doute quant à

l'existence de tels centres chez l'homme et à leur association avec le plaisir sexuel. Ainsi le plaisir apparaît-il comme un expédient majeur pour pousser les individus à céder aux caprices du sexe et donc, en fait, à se reproduire. Il s'agit d'un expédient relativement efficace si l'on en juge par l'état actuel de la population humaine du monde.

POUR TERMINER, UN EXEMPLE DE BRICOLAGE : LE CERVEAU HUMAIN

Bien que notre cerveau soit le principal organe de l'adaptation de notre espèce, ce qui est adapté dans le cerveau n'est pas encore très clair. Il est clair cependant que, comme pour le reste de notre corps, notre cerveau est le produit de la sélection naturelle, c'est-à-dire de reproductions différentielles accumulées pendant des millions d'années sous la pression de différentes conditions environnementales. Notre cerveau a donc évolué au service de nos gonades, comme cela a déjà été souligné par Freud il y a des années, mais, assez curieusement, le développement du cerveau chez les mammifères ne s'est pas intégré comme l'a été la transformation de la patte en aile par exemple. Le cerveau humain s'est transformé par superpositions en couches de nouvelles structures sur les anciennes. Un néocortex a été surajouté au vieux rhinencéphale des animaux primitifs, ce qui a rapidement, peut-être trop rapidement, joué un rôle déterminant dans les séquences évolutives qui ont finalement abouti à l'homme. Pour certains neurobiologistes, comme MacLean (13), ces deux types de structures correspondent à deux types de fonctions mais elles n'ont pas été complètement coordonnées ou hiérarchisées. La plus récente, le néocortex, contrôle l'activité intellectuelle, cognitive. La plus ancienne, dérivée du rhinencéphale, contrôle les activités émotionnelles et viscérales. À la différence du premier, ce dernier ne semble pas être capable d'établir des discriminations spécifiques et ne possède aucune capacité pour la symbolisation, le langage ou la conscience de soi. La structure ancienne qui, chez les mammifères les plus primitifs, est sous contrôle a été reléguée au seul département des émotions. Chez l'homme, il constitue ce que MacLean appelle «le cerveau viscéral». C'est peut-être parce que, chez l'homme, la période du développement est si longue et la maturité si tardive que ces centres maintiennent des connections aussi fortes avec les centres autonomes et continuent à coordonner des fonctions aussi vitales que l'obtention de nourriture, la recherche d'un partenaire sexuel ou les réactions face à un ennemi. Ce procédé évolutionniste, c'est-à-dire la formation d'un néocortex dominant couplé avec la persistance d'un système nerveux et hormonal partiellement mais pas totalement sous le contrôle du néocortex, ressemble beaucoup à ce que fait un bricoleur. C'est à peu de chose près comme si l'on ajoutait un moteur à réaction sur un vieux cheval de trait. Il n'est pas surprenant dans ces deux cas puissent survenir des accidents, des difficultés et des conflits.

Il est difficile de réaliser que le monde vivant que nous connaissons n'est juste qu'une possibilité parmi de nombreuses autres : sa structure actuelle résulte de l'histoire de la terre. Les organismes vivants sont bien des structures historiques,

littéralement des créations de l'histoire. Ils ne représentent pas les produits parfaits d'une ingénierie, mais un patchwork fait de morceaux récoltés çà et là quand et où se présente une opportunité. En ce qui concerne la sélection naturelle ce n'est pas simplement un problème d'indifférence à la structure et au mode opératoire de ses produits, il reflète la véritable nature d'un processus historique plein d'imprévus.

Comme l'a souligné Simpson (4), la rencontre d'opportunités locales - physiques, écologiques et constitutives - aboutit finalement à une opportunité historique qui, à son tour, détermine comment les opportunités génétiques seront exploitées. C'est cette opportunité historique ultime qui sera le principal responsable de la direction et de la marche de l'adaptation évolutive. C'est la raison pour laquelle la probabilité qu'un événement comme celui qui, sur terre, a conduit les êtres vivants jusqu'à l'homme, puisse survenir ailleurs dans le cosmos est pratiquement égale à zéro. Même si la vie dans l'espace utilise les mêmes matériaux que ceux qu'elle utilise sur terre, même si l'environnement n'y est pas si différent de celui que nous expérimentons sur notre planète, même si la nature de la vie et de sa chimie limite sérieusement les possibilités de remplir certaines fonctions, la séquence des opportunités historiques ne pourra pas être là-bas ce qu'elle est ici. Une pièce différente doit être jouée par des acteurs différents. En dépit de la science-fiction, les Martiens ne peuvent pas nous ressembler. Et nous aurions pu tout aussi bien ressembler à l'un de ces monstres du XVI^e siècle.



(traduit de l'anglais par Bernard Swynghedauw)

Références et notes

1. J. Perrin. *Les atomes* (Alcan, Paris, 1914).
2. P.B. Medawar. *The hope of progress* (Doubleday, New York, 1973).
3. C. Darwin. *On the origin of species* (London, 1859).
4. G.G. Simpson. *Evolution* 6, 342 (1952).
5. C. Lévi-Strauss. *La pensée sauvage* (Plon, Paris, 1962).
6. E. Mayr. *Fed. Proc. Fed. Am. Soc. Exp. Biol.* 23, 1231 (1964).
7. G.G. Simpson. *The meaning of evolution* (Yale Univ. Press, New Haven Conn, 1967).
8. N. Horowitz. *Adv Genet.* 3, 33 (1967).
9. V.M. Ingram. *Hemoglobins in genetics and evolution* (Columbia Univ. Press, New York, 1963).
10. S. Ohno. *Evolution by gene duplication* (Springer-Verlag, New York 1970).
11. M.C. King and A.C. Wilson. *Science* 188, 107 (1975).
12. A. Boue and J.G. Boue. In *Physiology and genetics of reproduction*. E. Coutinho and F. Fuchs eds (Plenum, New York, 1975), vol. 4b, p. 317.
13. P. McLean. *Psychosom. Med.* 11, 338 (1949).

Evolution and Tinkering

François Jacob

Some of the 16th-century books devoted to zoology and botany are illustrated by superb drawings of the various animals that populate the earth. Certain contain detailed descriptions of such creatures as dogs with fish heads, men with chicken legs, or even women without heads. The notion of monsters that blend the characteristics of different species is not itself surprising: everyone has imagined or sketched such hybrids. What is disconcerting today is that in the 16th century these creatures belonged, not to the world of fantasies, but to the real world. Many people had seen them and described them in detail. The monsters walked alongside the familiar animals of everyday life. They were within the limits of the possible.

When looking at present-day science fiction books, one is struck by the same phenomenon: the abominable animals that hunt the poor astronaut lost on a distant planet are products of recombinations between the organisms living on the earth. The creatures coming from outer space to explore the earth are depicted in the likeness of man. You can watch them emerging from their unidentified flying objects (UFO's); they are vertebrates, mammals without any doubt, walking erect. The only variations concern body size and the number of eyes. Generally these creatures have larger skulls than humans, to suggest bigger brains, and sometimes one or two radioantennae on the head, to suggest very sophisticated sense organs. The surprising point here again is what is considered possible. It is the idea, more than a hundred years after Darwin, that, if life occurs anywhere, it is bound to produce animals not too different from the terrestrial ones; and above all to evolve something like man.

The interest in these monsters is that they show how a culture handles the possible and marks its limits. It is a requirement of the human brain to put order in the universe. It seems fair to say that all cultures have more or less succeeded in providing their members with a unified and coherent view of the world and of the forces that run it. One may disagree with the explanatory systems offered by myths or magic, but one cannot deny them unity and coherence. In fact, they are often charged with too much unity and coherence because of their capacity to explain anything by the same simple argument. Actually, despite their differences, whether mythic, magic, or scientific, all explanatory systems operate on a common principle. In the words of the physicist Jean Perrin, the heart of the problem is always "to explain the complicated visible by some simple invisible" (1). A thunderstorm can be viewed as a consequence of Zeus' anger or of a difference of potential between the clouds and the earth. A disease can be seen as the result of a spell cast on the patient or of an infection by a virus. In all cases, however, one watches the visible effect of some hidden cause related to the whole set of invisible forces that are supposed to run the world.

The World View of Science

Whether mythic or scientific, the view of the world that man constructs is always largely a product of imagination. For the scientific process does not consist simply in observing, in collecting data, and in deducing from them a theory. One can watch an object for years and never produce any observation of scientific in-

terest. To produce a valuable observation, one has first to have an idea of what to observe, a preconception of what is possible. Scientific advances often come from uncovering a hitherto unseen aspect of things as a result, not so much of using some new instrument, but rather of looking at objects from a different angle. This look is necessarily guided by a certain idea of what the so-called reality might be. It always involves a certain conception about the unknown, that is, about what lies beyond that which one has logical or experimental reasons to believe. In the words of Peter Medawar, scientific investigation begins by the "invention of a possible world or of a tiny fraction of that world" (2). So also begins mythical thought. But it stops there. Having constructed what it considers as the only possible world, it easily fits reality into its scheme. For scientific thought, instead, imagination is only a part of the game. At every step, it has to meet with experimentation and criticism. The best world is the one that exists and has proven to work already for a long time. Science attempts to confront the possible with the actual.

The price to be paid for this outlook, however, turned out to be high. It was, and is perhaps more than ever, renouncing a unified world view. This results from the very way science proceeds. Most other systems of explanation—mythic, magic, or religious—generally encompass everything. They apply to every domain. They answer any possible question. They account for the origin, the present, and the end of the universe. Science proceeds differently. It operates by detailed experimentation with nature and thus appears less ambitious, at least at first glance. It does not aim at reaching at once a complete and definitive explanation of the whole universe, its beginning, and its present form. Instead, it looks for partial and provisional answers about those phenomena that can be isolated and well defined. Actually, the beginning of modern science can be dated from the time when such general questions as, "How was the universe created?"

The author is a professor of cell genetics at the Institut Pasteur, 28 Rue du Docteur Roux, 75015, Paris, France. This article is the text of a lecture delivered at the University of California, Berkeley, in March 1977.

What is matter made of? What is the essence of life?" were replaced by such limited questions as "How does a stone fall? How does water flow in a tube? How does blood circulate in vessels?" This substitution had an amazing result. While asking general questions led to limited answers, asking limited questions turned out to provide more and more general answers.

At the same time, however, this scientific method could hardly avoid a parceling out of the world view. Each branch of science investigates a particular domain that is not necessarily connected with the neighboring ones. Scientific knowledge thus appears to consist of isolated islands. In the history of sciences, important advances often come from bridging the gaps. They result from the recognition that two hitherto separate observations can be viewed from a new angle and seen to represent nothing but different facets of one phenomenon. Thus, terrestrial and celestial mechanisms became a single science with Newton's laws. Thermodynamics and mechanics were unified through statistical mechanics, as were optics and electromagnetism through Maxwell's theory of magnetic field, or chemistry and atomic physics through quantum mechanics. Similarly different combinations of the same atoms, obeying the same laws, were shown by biochemists to compose both the inanimate and the living worlds.

The Hierarchy of Objects

Despite such generalizations, however, large gaps remain, some of which probably will not be bridged for a long time, if ever. Today, there exists a series of sciences that differ, not only by the nature of the objects that are studied, but also by the concepts and the language that are used. These sciences can be arranged in a certain order—physics, chemistry, biology, psychosociology—an order that corresponds to the hierarchy of complexity found in the objects of these sciences. Following the line from physics to sociology, one goes from the simpler to the more complex objects and also, for obvious reasons, from the older to the younger science, from the poorer to the richer empirical content, as well as from the harder to the softer system of hypotheses and experimentation. In order to obtain a unified world view through science, the question has repeatedly been raised as to the possibility of making bridges between adjacent disciplines. Because of the hierarchy of ob-

jects, the problem is always to explain the more complex in terms and concepts applying to the simpler. This is the old problem of reduction, emergence, whole and parts, and so forth. Is it possible to reduce chemistry to physics, biology to physics plus chemistry, and so forth? Clearly an understanding of the simple is necessary to understand the more complex, but whether it is sufficient is questionable.

This type of question has resulted in endless arguments. Obviously, the two critical events of evolution—first the appearance of life and later that of thought and language—led to phenomena that previously did not exist on the earth. To describe and to interpret these phenomena, new concepts, meaningless at the previous level, are required. What can the notions of sexuality, of predator, or of pain represent in physics or chemistry? Or the ideas of justice, of increase in value or of democratic power in biology? At the limit, total reductionism results in absurdity. For the pretention that every level can be completely reduced to a simpler one would result, for example, in explaining democracy in terms of the structure and properties of elementary particles; and this is clearly nonsense.

This problem can be considered in a different way. One can look at the series of objects, moving from the simpler to the more complex. Molecules are made of atoms. They therefore obey the laws that determine the behavior of atoms. But, in addition, two statements can be made about molecules. First, they can exhibit new properties, such as isomerization, racemization, and so forth. Second, the subject matter of chemistry, the molecules found in nature or produced in the laboratory, represents only a small fraction of all the possible interactions between atoms. Chemistry constitutes, therefore, a special case of physics. This is even more so with biology that deals with a complex hierarchy of objects ranging from cells to populations and ecosystems. The objects which exist at each level constitute a limitation of the total possibilities offered by the simpler level. For instance, the set of molecules found in living organisms represents a very restricted range of chemical objects. At the next level, the number of animal species amounts to several millions; however, this is small relative to the number that could exist. All vertebrates are composed of a very limited number of cellular types, at most 200, such as muscle cells, skin cells, and nerve cells. The great diversity of vertebrates results from differences in the ar-

rangement, in the number, and in the proportion of these 200 types. Similarly, the human societies with which ethnology and sociology deal represent only a restricted group of all possible interactions between human beings.

Constraints and History

Nature functions by integration. Whatever the level, the objects analyzed by natural sciences are always organizations, or systems. Each system at a given level uses as ingredients some systems of the simpler level, but some only. The hierarchy in the complexity of objects is thus accompanied by a series of restrictions and limitations. At each level, new properties may appear which impose new constraints on the system. But these are merely additional constraints. Those that operate at any given level are still valid at all more complex levels. Every proposition that is true for physics is also true for chemistry, biology, or sociology. Similarly every proposition that is valid for biology holds true in sociology. But as a general rule, the statements of greatest importance at one level are of no interest at the more complex ones. The law of perfect gases is no less true for the objects of biology or sociology than for those of physics. It is simply irrelevant in the context of the problems with which biologists, and even more so sociologists, are concerned.

This hierarchy of successive integrations, characterized by restrictions and by the appearance of new properties at each level, has several consequences. The first is the necessity of analyzing complex objects at all levels. If molecular biology, which presents a strong reductionist attitude, yielded such a successful analysis of heredity, it was mainly because, at every step, the analysis was carried out simultaneously at the level of the molecules and at the level of the black box, the bacterial cell. This applies also to recent developments in immunology. And it seems likely that such a convergence of analysis will play an important role in the study of human beings and their societies.

The second point concerns predictability. Is it possible to make predictions at one level on the basis of what is known at a simpler one? Only to a very limited extent. The properties of a system can be explained by the properties of its components. They cannot be deduced from them. Starting from fundamental laws of physics, there is no way of reconstructing the universe. This means that a

particular system, say a cell, has only a certain probability of appearing. All predictions about its existence can only be statistical. Molecular biology has shown that ultimately the characteristics of a cell rest on the structure of its molecular components. But the appearance of life on the earth was not the necessary consequence of the presence of certain molecular structures in prebiotic times. In fact, there is absolutely no way of estimating what was the probability for life appearing on earth. It may very well have appeared only once.

The third point concerns the nature of the restrictions and limitations found at every step of increasing complexity. Can one explain why, among all the possible interactions at one level, only certain are actually observed at the more complex one? How is it that only some types of molecular structures are present, for instance, in living organisms? Or only some interactions in human societies? There is no general answer to such questions, and it seems doubtful that there will ever be a specific answer for any one particular level of complexity. Complex objects are produced by evolutionary processes in which two factors are paramount: the constraints that at every level control the systems involved, and the historical circumstances that control the actual interactions between the systems. The combination of constraints and history exists at every level, although in different proportions. Simpler objects are more dependent on constraints than on history. As complexity increases, history plays a greater part. But history has always to be introduced into the picture, even in physics. According to present theories, heavier nuclei are composed of lighter ones and ultimately of hydrogen nuclei and neutrons. The transformation of heavy hydrogen into helium occurs during the fusion process, which is the main source of energy in the sun as well as in hydrogen bombs. Helium and all the heavier elements are thus the result of a cosmological evolution. According to present views, the heavier elements are considered as products of supernovae explosions. They seem to be very rare and not to exceed 1 or 2 percent by mass of all matter, while helium represents one-fifth and hydrogen four-fifths of all matter. The earth and the other planets of the solar system have thus been made of very rare material under conditions that seem to be rarely encountered in the cosmos. The source of hydrogen itself is left to theories and speculations concerning the origin of the universe.

Natural Selection

The constraints to which systems are subjected vary with the level of complexity. There are always some constraints imposed by stability and thermodynamics. But as complexity increases, additional constraints appear—such as reproduction for living systems, or economic requirements for social systems. Consequently, there cannot be any general law of evolution, any recipe that accounts for increasing complexity at all levels. Since Darwin, biologists have progressively elaborated a reasonable, although still incomplete, picture of the mechanism that operates in the evolution of the living world, namely, natural selection. For many, it has been tempting to invoke a similar mechanism of selection to describe any possible evolution, whether cosmological, chemical, cultural, ideological, or social. But this seems condemned to fail from the outset. The rules of the game differ at each level. New principles have, therefore, to be worked out at each level.

Natural selection is the result of two constraints imposed on every living organism: (i) the requirement for reproduction, which is fulfilled through genetic mechanisms carefully adjusted by special devices such as mutation, recombination, and sex to produce organisms similar, but not identical, to their parents; and (ii) the requirement for a permanent interaction with the environment because living beings are what thermodynamicists call open systems and persist only by a constant flux of matter, energy, and information. The first of these factors generates random variations and produces populations in which all individuals are different. The interplay of the two factors results in differential reproduction and consequently in populations that evolve progressively as a function of environmental circumstances, of behavior, and of new ecological niches. But natural selection does not act merely as a sieve eliminating detrimental mutations and favoring reproductions of beneficial ones as is often suggested. In the long run, it integrates mutations, and it orders them into adaptatively coherent patterns adjusted over millions of years, and over millions of generations as a response to environmental challenges. It is natural selection that gives direction to changes, orients chance, and slowly, progressively produces more complex structures, new organs, and new species. Novelty comes from previously unseen association of old material. To create is to recombine.

Engineer and Tinkerer

The action of natural selection has often been compared to that of an engineer. This, however, does not seem to be a suitable comparison. First, because in contrast to what occurs in evolution, the engineer works according to a preconceived plan in that he foresees the product of his efforts. Second, because of the way the engineer works: to make a new product, he has at his disposal both material specially prepared to that end and machines designed solely for that task. Finally, because the objects produced by the engineer, at least by the good engineer, approach the level of perfection made possible by the technology of the time. In contrast, evolution is far from perfection. This is a point which was repeatedly stressed by Darwin who had to fight against the argument of perfect creation. In the *Origin of Species*, Darwin emphasizes over and over again the structural or functional imperfections of the living world. For instance, when he discusses natural selection (3, p. 472):

Nor ought we to marvel if all the contrivances in nature be not, as far as we can judge, absolutely perfect. We need not marvel at the sting of the bee causing the bee's own death; at drones being produced in such vast numbers for one single act, and being then slaughtered by their sterile sisters; at the astonishing waste of pollen by our fireflies; at the instinctive hatred of the queen bee for her own fertile daughters; at ichneumonidae feeding within the live bodies of caterpillars; and at other such cases. The wonder indeed is, on the theory of natural selection, that more cases of the want of absolute perfection have not been observed.

There are innumerable statements of this type in the *Origin of Species*. In fact, one of the best arguments against perfection comes from extinct species. While the number of living species in the animal kingdom can be estimated to be around a few million, the number of extinct ones since life existed on earth has been estimated by Simpson (4) at around five hundred million.

Natural selection has no analogy with any aspect of human behavior. However, if one wanted to play with a comparison, one would have to say that natural selection does not work as an engineer works. It works like a tinkerer—a tinkerer who does not know exactly what he is going to produce but uses whatever he finds around him whether it be pieces of string, fragments of wood, or old cardboards; in short it works like a tinkerer who uses everything at his disposal to produce some kind of workable object. For the engineer, the realization

of his task depends on his having the raw materials and the tools that exactly fit his project. The tinkerer, in contrast, always manages with odds and ends. What he ultimately produces is generally related to no special project, and it results from a series of contingent events, of all the opportunities he had to enrich his stock with leftovers. As was discussed by Levi-Strauss (5), none of the materials at the tinkerer's disposal has a precise and definite function. Each can be used in a number of different ways. In contrast with the engineer's tools, those of the tinkerer cannot be defined by a project. What these objects have in common is "it might well be of some use." For what? That depends on the opportunities.

Evolution as Tinkering

This mode of operation has several aspects in common with the process of evolution. Often, without any well-defined long-term project, the tinkerer gives his materials unexpected functions to produce a new object. From an old bicycle wheel, he makes a roulette; from a broken chair the cabinet of a radio. Similarly evolution makes a wing from a leg or a part of an ear from a piece of jaw. Naturally, this takes a long time. Evolution behaves like a tinkerer who, during eons upon eons, would slowly modify his work, unceasingly retouching it, cutting here, lengthening there, seizing the opportunities to adapt it progressively to its new use. For instance, the lung of terrestrial vertebrates was, according to Mayr (6), formed in the following way. Its development started in certain freshwater fishes living in stagnant pools with insufficient oxygen. They adopted the habit of swallowing air and absorbing oxygen through the walls of the esophagus. Under these conditions, enlargement of the surface area of the esophagus provided a selective advantage. Diverticula of the esophagus appeared and, under continuous selective pressure, enlarged into lungs. Further evolution of the lung was merely an elaboration of this theme—enlarging the surface for oxygen uptake and vascularization. To make a lung with a piece of esophagus sounds very much like tinkering.

Unlike engineers, tinkerers who tackle the same problem are likely to end up with different solutions. This also applies to evolution, as exemplified by the variety of eyes found in the living world [see (7)]. It is obviously a great advantage under many conditions to possess light receptors, and the variety of photoreceptors in the living world is amazing. The

most sophisticated are the image-forming eyes that provide information, not only on the intensity of incoming light, but also on the objects light comes from, on their shape, color, position, motion, speed, distance, and the like. Such sophisticated structures are necessarily complex. They can develop only in organisms already complex themselves. One might suppose, therefore, that there is just one way of producing such a structure. This is not the case. Eyes appeared a great many times in the course of evolution, based on at least three principles—pinhole, lens, and multiple tubes. Lens eyes, like ours, appeared both in mollusks and vertebrates. Nothing looks so much like our eye as the octopus eye. Both work in almost exactly the same way. Yet they did not evolve in the same way. Whereas in vertebrates photoreceptor cells of the retina point away from light, in mollusks they point toward light. Among all solutions found to the problem of photoreceptors, these two are similar but not identical. In each case, natural selection did what it could with the materials at its disposal.

Evolution does not produce novelties from scratch. It works on what already exists, either transforming a system to give it new functions or combining several systems to produce a more elaborate one. This happened, for instance, during one of the main events of cellular evolution: namely, the passage from unicellular to multicellular forms. This was a particularly important transition because it carried an enormous potential for a specialization of the parts. Such a transition, which probably occurred several times, did not require the creation of new chemical species, for there are no major differences between molecular types of uni- and multicellular organisms. It was mainly a reorganization of what already existed.

Molecular Tinkering

It is at the molecular level that the tinkering aspect of natural selection is perhaps most apparent. What characterizes the living world is both its diversity and its underlying unity. The living world contains bacteria and whales, viruses and elephants; organisms living at -20°C in polar areas and others at 70°C in hot springs. All these objects, however, exhibit a remarkable unity of chemical structures and functions. Similar polymers, nucleic acids or proteins, always made of the same basic elements, the four bases and the 20 amino acids, play similar roles. The genetic code is the

same and the translating machineries are very nearly so. The same coenzymes mediate similar reactions. Many metabolic steps remain essentially the same, from bacteria to man. Obviously, for life to emerge, a number of new molecular types had first to be formed. During chemical evolution in prebiotic times and at the beginning of biological evolution, all those molecules of which every living being is built had to appear. But once life had started in the form of some primitive self-reproducing organism, further evolution had to proceed mainly through alterations of already existing compounds. New functions developed as new proteins appeared. But these were merely variations on previous themes. A sequence of a thousand nucleotides codes for a medium-sized protein. The probability that a functional protein would appear *de novo* by random association of amino acids is practically zero. In organisms as complex and integrated as those that were already living a long time ago, creation of entirely new nucleotide sequences could not be of any importance in the production of new information.

The appearance of new molecular structures during much of biological evolution must, therefore, have rested on alteration of preexisting ones. This is exemplified by the finding that large segments of genetic information, that is, of DNA, turn out to be homologous, not only in the same organism, but also among different organisms, even among those that are phylogenetically distant. Similarly, as more is known about amino acid sequences in proteins, it appears not only that proteins fulfilling similar functions in different organisms have frequently similar sequences, but also that proteins with different functions often exhibit rather large segments in common. The hypothesis most generally envisaged to account for these similarities was proposed by Horowitz (8), by Ingram (9), and by Ohno (10). A segment of DNA, corresponding to one or several genes, is assumed to be duplicated by some genetic mechanism. When a gene exists in more than one copy in a cell or a gamete, it is released from the constraints imposed on functions by natural selection. Mutations can then accumulate more or less freely and result in modified protein structures, some of which can eventually fulfill new functions. Since natural selection exerts a continual pressure on organisms, an alteration in a protein can be further improved by other, later changes. It can also lead to a perturbation in the interactions with other proteins and eventually favor modifications of these proteins. A large fraction

of the genome of complex organisms might actually derive from a few ancestral genes.

Biochemical changes do not seem, therefore, to be a main driving force in the diversification of living organisms. The really creative part in biochemistry must have occurred very early. For the biochemical unity that underlies the living world makes sense only if most of the important molecular types found in organisms, that is, most of the metabolic pathways involved in the production of energy and in biosynthesis or degradation of the essential building blocks already existed in very primitive organisms such as bacteria. Once this stage passed, biochemical evolution continued as more complex organisms appeared. But it is not biochemical novelties that generated diversification of organisms. In all likelihood, it worked the other way around. It is the selective pressure resulting from changes in behavior or in ecological niches that led to biochemical adjustments and changes in molecular types. What distinguishes a butterfly from a lion, a hen from a fly, or a worm from a whale is much less a difference in chemical constituents than in the organization and the distribution of these constituents. The few big steps of evolution required acquisition of new information. But specialization and diversification occurred by using differently the same structural information. Among neighboring groups, vertebrates for instance, chemistry is the same. What makes one vertebrate different from another is a change in the time of expression and in the relative amounts of gene products rather than the small differences observed in the structure of these products. It is a matter of regulation rather than of structure [see (11)].

After egg fertilization, embryonic development occurs in a fixed order and according to a precise schedule set by the genetic program contained in the chromosomes. This program determines when and where lines of differentiated cells will emerge, when and where different proteins will be made and in what amounts. Both the quality and quantity of the different proteins vary in time and space during development. Thus in the adult, the various types of cells or tissues contain different repertoires of molecular types in agreement with their functions. The genetic program is executed through complex regulatory circuits that switch the different biochemical activities of the organism on or off. Very little is known as yet about the regulatory circuits that operate in the development of complex organisms. It is known, however, that,

among related organisms such as mammals, the first steps of embryonic development are remarkably similar, with divergences showing up only progressively as development proceeds. These divergences concern much less the actual structure of cellular or molecular types than their number and position. It seems likely that divergence and specialization of mammals, for instance, resulted from mutations altering regulatory circuits rather than chemical structures. Small changes modifying the distribution in time and space of the same structures are sufficient to affect deeply the form, the functioning, and the behavior of the final product—the adult animal. It is always a matter of using the same elements, of adjusting them, of altering here or there, of arranging various combinations to produce new objects of increasing complexity. It is always a matter of tinkering.

Consequences of Tinkering

Marks of this tinkering are thus found at every level throughout the living world. Of course, they can be found in human beings as shown by the following few examples. In humans, as in many mammals, there exist very complex processes responsible for such functions as blood coagulation, inflammatory reactions against foreign bodies, and the immunological defenses mediated by the so-called complement system. These three processes have been independently analyzed in some detail during recent years. Each one exhibits an unexpected complexity. Each involves about ten proteins, none of which initially has enzymatic activity. Conversion of the first protein into a catalytically active form triggers a cascade of reactions. The first protein cleaves the second one at a specific point; a product of this reaction cleaves the third protein, and so on. In this series of reactions, the individual proteins are thus split in sequence and the released fragments serve as activators, or inhibitors, in other reactions of the chain. Furthermore, these three chains of reactions are not wholly independent. A product of cleavage in one chain can suddenly become an active element in another chain or even play a role in a completely different process. These products may serve as signals to connect chemically unrelated, but physiologically dependent, systems. It is as though some protein molecules, which happened to be formed, were used here or there as a source of smaller but active peptides as new functions were taking shape. Recently, a number of peptides of

different sizes have been found to participate in a variety of physiological processes. Some of them, such as hormone peptides or brain peptides, are known not to be chemically transformed in the reaction they activate or inhibit. They appear just to bind to some protein to favor an allosteric transition, thus acting as simple chemical signals. For the biologist, it is thus generally impossible to make a prediction, or even an inspired guess, about the nature of such molecules and their structural relations with other constituents. All he can do is to detect them, purify them, and analyze them. Later, as the structures of more proteins become known, there will perhaps be a chance to define the functional interrelations and evolutionary relationship among such molecules.

Another example of tinkering can be found in early human embryonic development. Embryonic development is a tremendously complicated process of which little is known at present. Studies of the past 10 or 20 years have revealed an amazing phenomenon. In various human populations, 50 percent of all conceptions are estimated to result in spontaneous abortion [see (12)]. A large fraction of these abortions occur during the first 3 weeks of pregnancy and generally pass unnoticed. Thus, in half of the total conceptions, something is wrong to begin with. Many of these spontaneous abortions appear to be due to an odd number of chromosomes; instead of having one set of chromosomes derived from its mother and one from its father, the embryo lacks a chromosome, or has an extra one, or even has three sets instead of two. As a result, some functions necessary to embryonic development are not performed correctly. The fetus dies and is expelled. Thus many potentially malformed fetuses disappear; not all, unfortunately, since some of them still come to term. This reveals the imperfections of a mechanism that is at the very core of any living system and that has been refined over millions of years.

A third example of tinkering which is very intriguing when one thinks about it is the association between reproduction and what is generally called pleasure. Sex is one of the most efficient inventions of evolution. In lower organisms which apparently reproduce asexually by fission, the genetic program is scrupulously recopied at every generation. Within a population, it always remains the same, except for rare mutations. Division of the organism is an automatic process resulting from growth. When something resembling sexuality exists, as in bacteria, it is a luxury. In such pop-

ulations, adaptation necessarily involves the selection of rare mutants under environmental conditions. In contrast, sexual reproduction, which probably occurred early in evolution, compels reassortment of genetic programs in interbreeding populations. As a result, every genetic program (that is, every individual) is different from the others. This permanent reshuffling of genetic elements provides tremendous potentialities of adaptation. But once sexuality had become a necessary condition for reproduction, it required special mechanisms: one, allowing individuals of opposite sexes to recognize and meet each other and a second, driving them to unite. The first of these requirements has been fulfilled by a variety of specific signaling systems—visual, auditory, or olfactory—of amazing precision and efficiency. The second has been met through the development of genetically determined and very rigid programs of behavior. For instance, in birds, at the proper season, the view of an individual of the opposite sex initiates a whole process of rituals, courtship, and parade leading almost automatically to copulation, nidation, and progeny care. The course of evolution, however, is characterized by a trend to greater flexibility in the execution of the genetic program. As this program became more open, so to speak, the behavior became less rigidly determined by the genes. Reactions to sexual signals were no longer completely automatic. In order to drive the individuals toward reproduction, sexuality had therefore to be associated with some other devices. Among these was pleasure. In the Oxford dictionary, pleasure is defined as "the opposite of pain," obviously, but also as "the condition of consciousness induced by the enjoyment of what is felt or viewed as good or desirable." It seems likely that feelings of discomfort and pleasure must already have existed for a long time in complex animals. An animal is more likely to have progeny if a feeling of discomfort dissuades it from entering harmful situations. It is clear that the existence of nervous centers, connected with sense organs and able to correlate what is felt as pleasant or unpleasant with what is actually good or bad for survival, is of great selective value. In fact, such centers are now known to exist. Some 20 years ago, neurobiologists detected in the brain, first in the rat and later in many vertebrates, the presence of two remarkable centers—one called the center of aversion and the other called the center of autostimulation. Fitted with correctly implanted electrodes and given the means of activating at will the latter cen-

ter, a rat gives himself pleasure until it collapses from sheer exhaustion. Experiments performed during brain surgery and descriptions of feelings by the patients leave very little doubt as to the existence of such centers in man and to its association with sexual activity. Thus pleasure appears as a mere expedient to push individuals to indulge in sex and therefore to reproduce. A rather successful expedient indeed, as judged by the state of the world population.

A Final Example of Tinkering:

The Human Brain

Although our brain represents the main adaptive feature of our species, what it is adapted to is not clear at all. What is clear, however, is that, like the rest of our body, our brain is a product of natural selection, that is, of differential reproductions accumulated over millions of years under the pressure of various environmental conditions. Our brain has therefore evolved at our gonad's service, as already emphasized by Freud many years ago. But curiously enough, brain development in mammals was not as integrated a process as, for instance, the transformation of a leg into a wing. The human brain was formed by superposition of new structures on old ones. To the old rhinencephalon of lower mammals a neocortex was added that rapidly, perhaps too rapidly, took a most important role in the evolutionary sequence leading to man. For some neurobiologists, especially McLean (13), these two types of structures correspond to two types of functions but have not been completely coordinated or hierarchized. The recent one, the neocortex, controls intellectual, cognitive activity. The old one, derived from the rhinencephalon, controls emotional and visceral activities. In contrast to the former, the latter does not seem to possess any power of specific discrimination, or any capacity for symbolization, language, or self-consciousness. The old structure which, in lower mammals, was in total command has been relegated to the department of emotions. In man, it constitutes what McLean calls "the visceral brain." Perhaps because development is so prolonged and maturity so delayed in man, these centers maintain strong connections with lower autonomic centers and continue to coordinate such fundamental drives as obtaining food, hunting for a sexual partner, or reacting to an enemy. This evolutionary procedure—the formation of a dominating neocortex coupled with the persistence of a nerv-

ous and hormonal system partially, but not totally under the rule of the neocortex—strongly resembles the tinkerer's procedure. It is somewhat like adding a jet engine to an old horse cart. It is not surprising, in either case, that accidents, difficulties, and conflicts can occur.

It is hard to realize that the living world as we know it is just one among many possibilities; that its actual structure results from the history of the earth. Yet living organisms are historical structures: literally creations of history. They represent, not a perfect product of engineering, but a patchwork of odd sets pieced together when and where opportunities arose. For the opportunism of natural selection is not simply a matter of indifference to the structure and operation of its products. It reflects the very nature of a historical process full of contingency.

As Simpson (4) pointed out, the interplay of local opportunities—physical, ecological, and constitutional—produces a net historical opportunity which in turn determines how genetic opportunities will be exploited. It is this net historical opportunity that mainly controls the direction and pace of adaptive evolution. This is why the probability is practically zero that living systems, which might well exist elsewhere in the cosmos, would have evolved into something looking like human beings. Even if life in outer space uses the same material as on the earth, even if the environment is not too different from ours, even if the nature of life and of its chemistry strongly limits the way to fulfill certain functions, the sequence of historical opportunities there could not be the same as here. A different play had to be performed by different actors. Despite science fiction, Martians cannot look like us. And we might as well have looked like one of those 16th-century monsters.

References and Notes

1. J. Perrin, *Les Atomes* (Alcan, Paris, 1914).
2. P. B. Medawar, *The Hope of Progress* (Doubleday, New York, 1973).
3. C. Darwin, *On the Origin of Species* (London, 1859).
4. G. G. Simpson, *Evolution* 6, 342 (1952).
5. C. Lévi-Strauss, *La Pensée Sauvage* (Plon, Paris, 1962).
6. E. Mayr, *Fed. Proc. Fed. Am. Soc. Exp. Biol.* 23, 1231 (1964).
7. G. G. Simpson, *The Meaning of Evolution* (Yale Univ. Press, New Haven, Conn., 1967).
8. N. Harlowitz, *Adv. Genet.* 3, 33 (1950).
9. V. M. Ingram, *Hemoglobins in Genetics and Evolution* (Columbia Univ. Press, New York, 1963).
10. S. Ohno, *Evolution by Gene Duplication* (Springer-Verlag, New York, 1970).
11. M. C. King and A. C. Wilson, *Science* 188, 107 (1975).
12. A. Boue and J. G. Boue, in *Physiology and Genetics of Reproduction*, E. Coutinho and F. Fuchs, Eds. (Plenum, New York, 1975), vol. 4b, p. 317.
13. P. McLean, *Psychosom. Med.* 11, 338 (1949).